

RAPORT ZADANIE 1 ETAP 2

Warszawa, 10 marca 2021

ZADANIE 1, Etap 2: Obliczenie wydajności układu (mierzonej w W/m²) w zależności od sposobu formowania i prowadzenia odbitych wiązek w układzie

W ramach zadania przeprowadzono symulacje wcześniej zaproponowanych konfiguracji przestrzennego ogniwa perowskitowego oraz obliczono ich teoretyczne wydajności (mierzonej w W/m²) w zależności od sposobu formowania i prowadzenia odbitych wiązek w układzie.

Wstępne koncepcje zakładały wykorzystanie komponentów:

- rura ze szkła hartowanego lub plastiku o średnicy 0,05-0,2m i długości od 0,2-0,4m, zamknięta z jednej strony soczewką, a z drugiej zwierciadłem sferycznym;
- profil ze stali o średnicy lub boku kwadratu 0,05-0,2m i długości od 0,2-0,4m, zamknięta z jednej strony soczewką, a z drugiej zwierciadłem sferycznym.

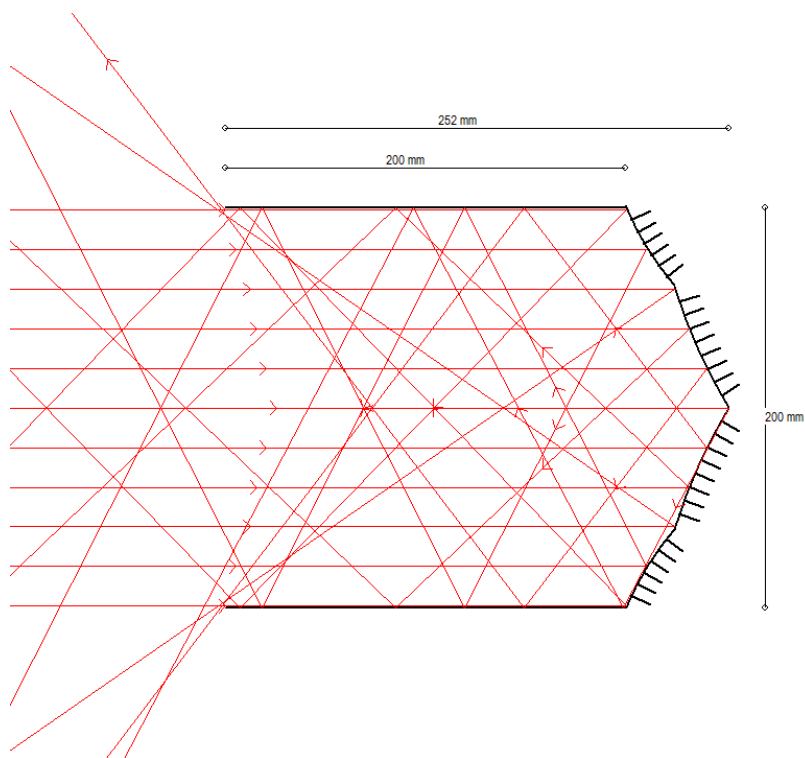
Ze względu na najkorzystniejszy układ paneli perowskitowych (decydowano się projektować układy w oparciu o ich ułożenie w obudowie w postaci walca. Dodatkowo symetria wokół środkowej osi wpływa korzystnie na prowadzenie i rozkład promieni świetlnych w układzie.

Wszystkie symulacje działania konfiguracji przeprowadzono z wykorzystaniem profesjonalnego narzędzia - środowiska TracePRO w wersji 21.1. Jest to kompleksowe rozwiązanie umożliwiające modelowanie źródeł światła, układów optycznych z uwzględnieniem definiowalnych parametrów materiałowych i prowadzenie dokładnego biegu promieni. Na jego podstawie obliczany jest rozkład natężenia promieniowania padającego na panel perowskitowy zamknięty w obudowie. Dodatkowo w analizach wykorzystano modele zwierciadeł opracowane w środowisku SolidWorks.

1. Modelowanie matematyczne i ocena wydajności

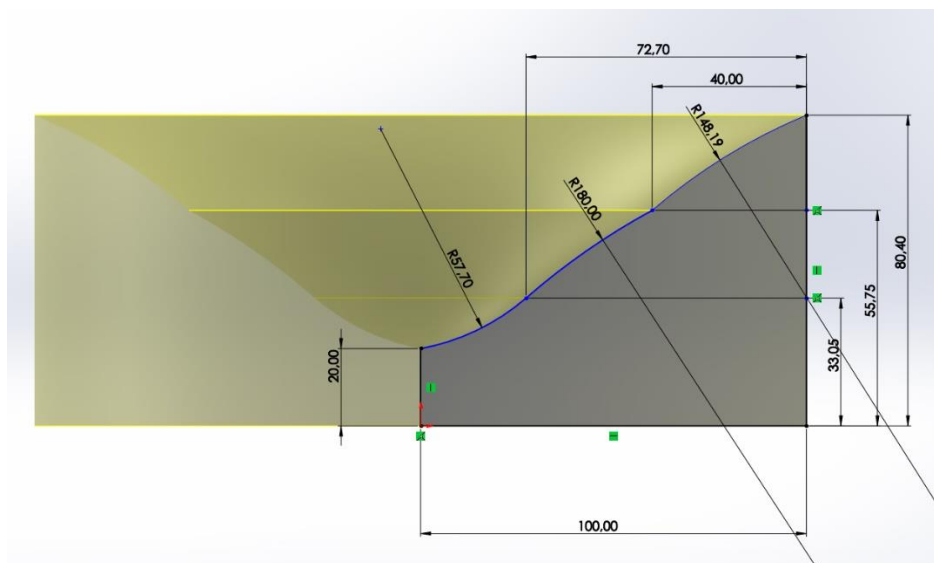
Podstawowe kroki modelowania matematycznego

1. Opracowanie poglądowego modelu geometrycznego.



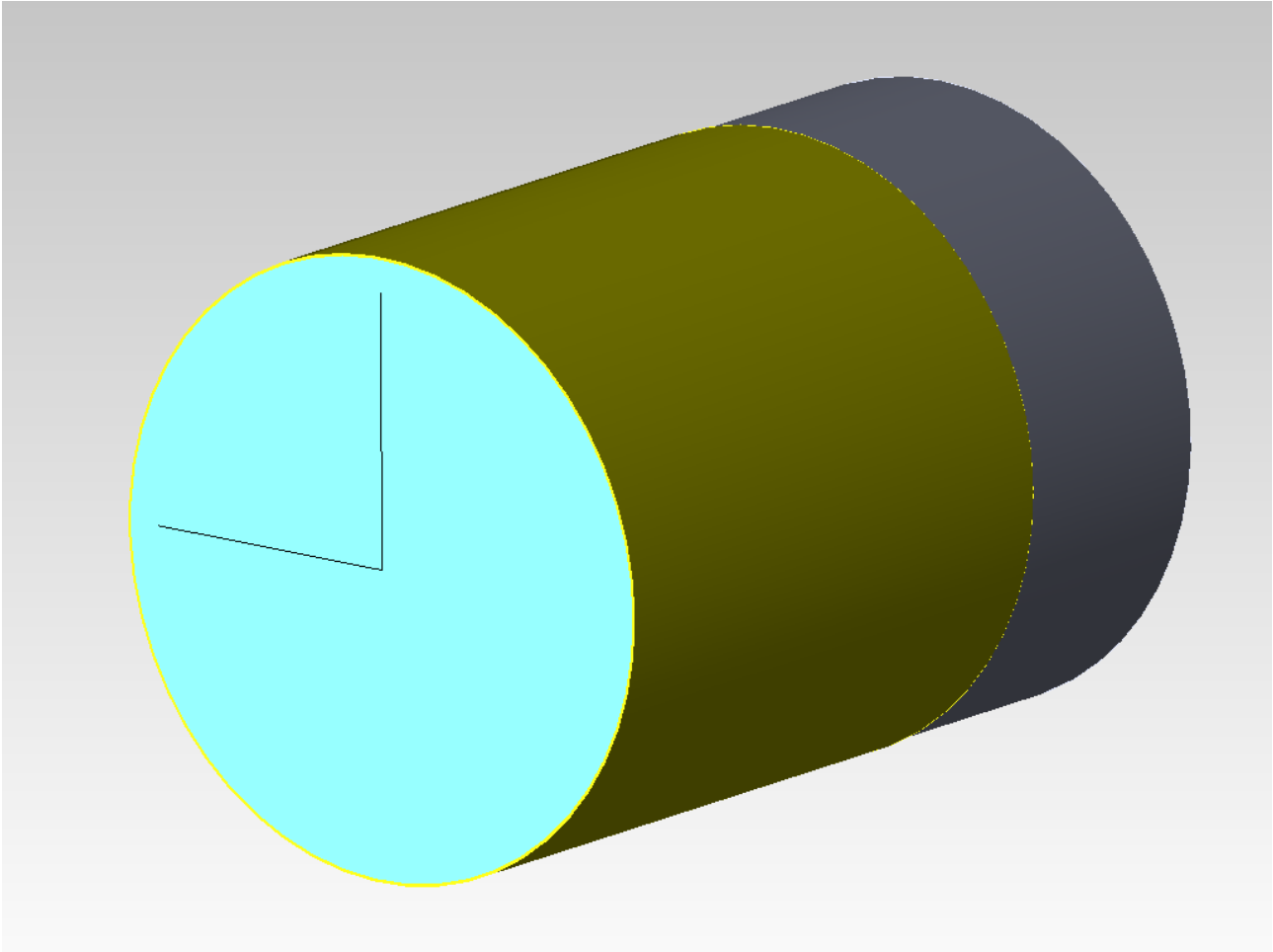
Rys. 5.1 Przykładowy model geometryczny.

2. Przygotowanie modelu 3D zwierciadła o geometrii zaprojektowanej w podpunkcie 1.



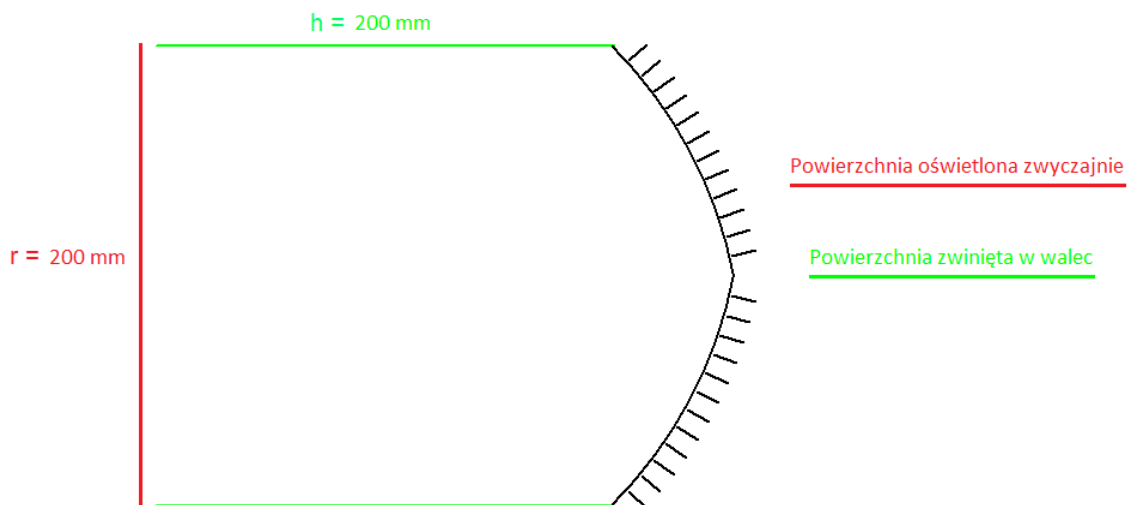
Rys. 5.2 Przekrój modelu 3D zwierciadła.

3. Zaimportowanie modelu zwierciadła do programu TracePRO oraz analiza zaprojektowanego układu.



Rys. 5.3 Model ogniwa w programie TracePRO.

Celem symulacji było przeprowadzenie analizy wpływu zaprojektowanych konfiguracji na poziom mocy wytworzonej przez materiał aktywny zwinięty w walec w stosunku do mocy wytworzonej przez ogniwo oświetlone zwyczajnie (tzn. takie, które pokrywałyby powierzchnię apertury wejściowej cylindra i było oświetlone bezpośrednio bez użycia dodatkowych elementów optycznych).



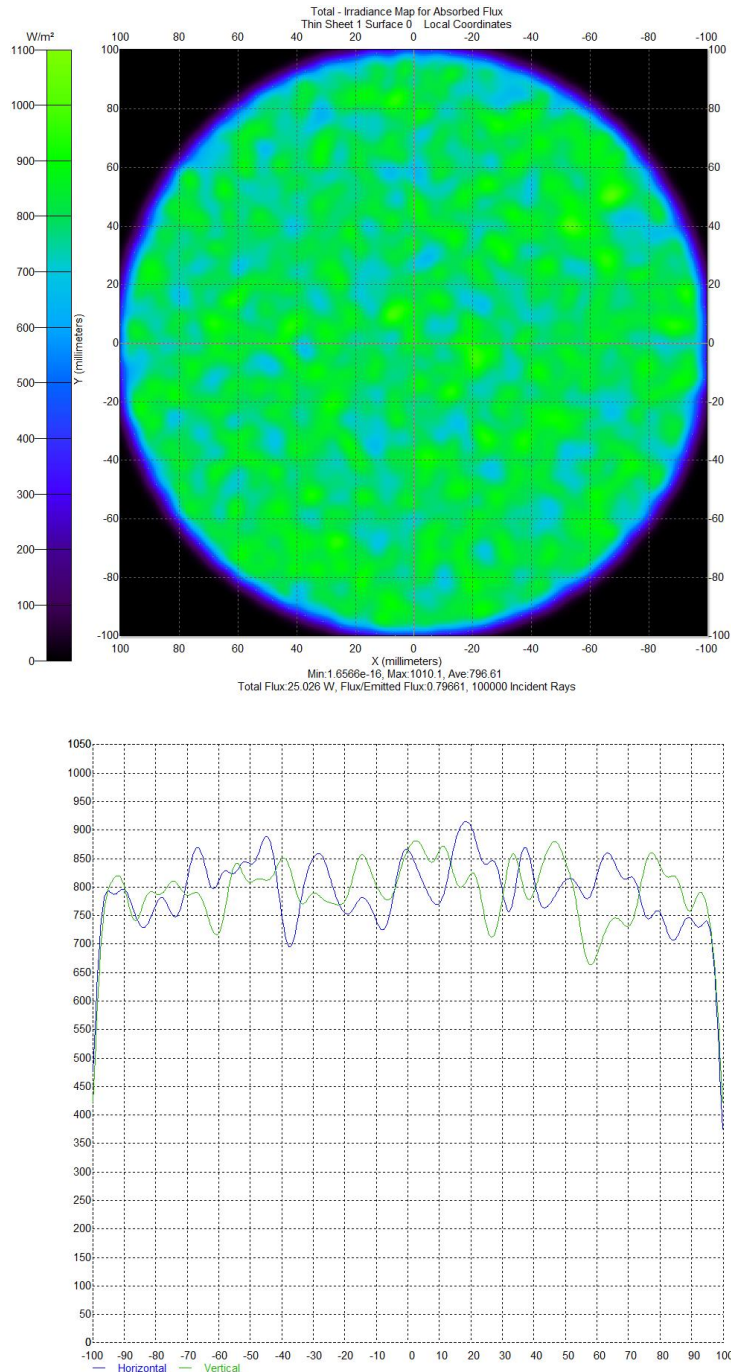
Rys. 5.4 Schemat oświetlanych powierzchni.

Założenia do przeprowadzonych symulacji:

- ogniwa oświetlane są falą płaską o irradiancji 1000 W/m^2 ;
- współczynnik absorpcji panela perowskitowego wynosi 0,8;
- współczynnik odbicia panela perowskitowego wynosi 0,2;
- panele z folii z perowskitem zostają zwinięte i ułożone na całej wewnętrznej powierzchni walca o wymiarach $200 \times 200 \text{ mm}$;
- wydajność teoretyczna paneli wynosi 10%.

Konfiguracja 0 – referencja

W tej konfiguracji oświetlono panel ułożony na aperturze wejściowej układu cylindra.



Rys. 5.5 Rozkład natężenia - konfiguracja referencyjna 0

Zakładając, że wydajność ogniwa wynosi 10%, uzyskano **2.5026 W** mocy na panelu w danej konfiguracji. Średnia irradiancja uzyskana na tej powierzchni to **800 W/m²**.

W związku z wynikami uzyskanymi w etapie pierwszym projektu, poniżej opisane symulacje przeprowadzono na wybranych konfiguracjach. Poniższe konfiguracje numerowane są według numerowania przedstawionego w raporcie z etapu pierwszego.

Konfiguracja 2.5

Parametry konfiguracji:

- Promień soczewki wynosi 100 mm, a jej ogniskowa 40 mm
- Soczewka umieszczona w otworze cylindra.
- Zwierciadła na dnie to skupiające zwierciadła sferyczne, skierowane na zewnątrz cylindra o promieniu krzywizny równym 191.5 mm.

Moc uzyskana na ogniwie – 1.0701 W

Konfiguracja 2.6

Parametry konfiguracji:

- Promień soczewki wynosi 200 mm, a jej ogniskowa 50 mm.
- Soczewka umieszczona w otworze cylindra.
- Zwierciadła na dnie to skupiające zwierciadła sferyczne, skierowane na zewnątrz cylindra o promieniu krzywizny równym 179.23 mm.

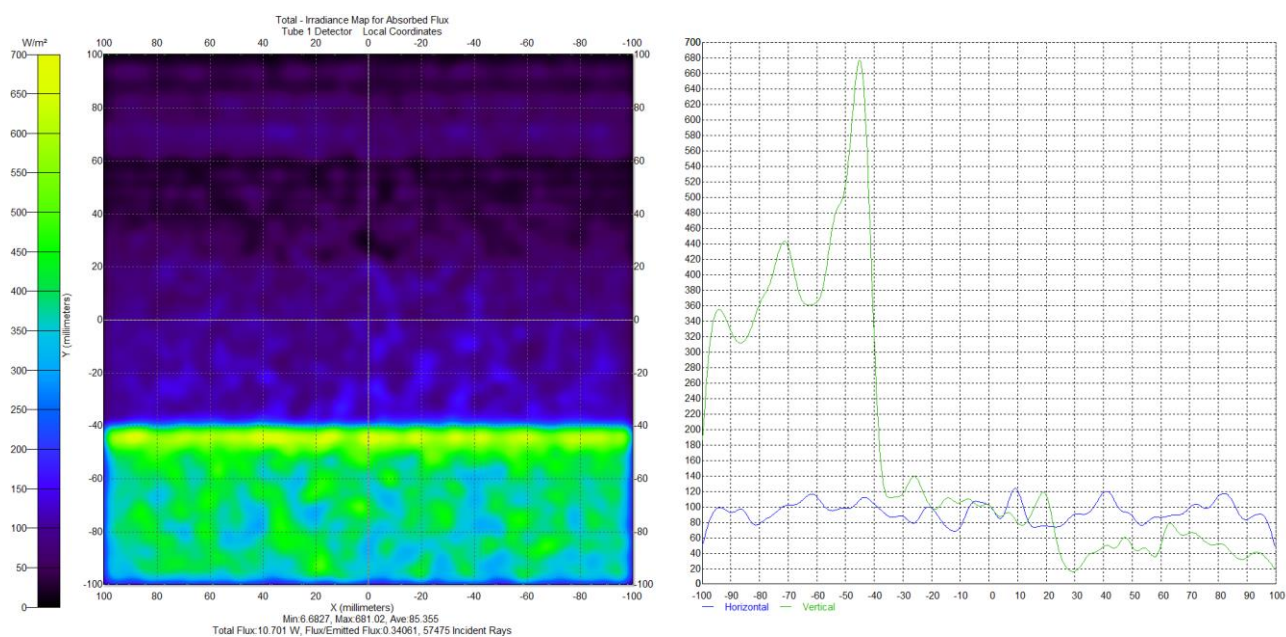
Moc uzyskana na ogniwie – 1.2392 W

Konfiguracja 3.1

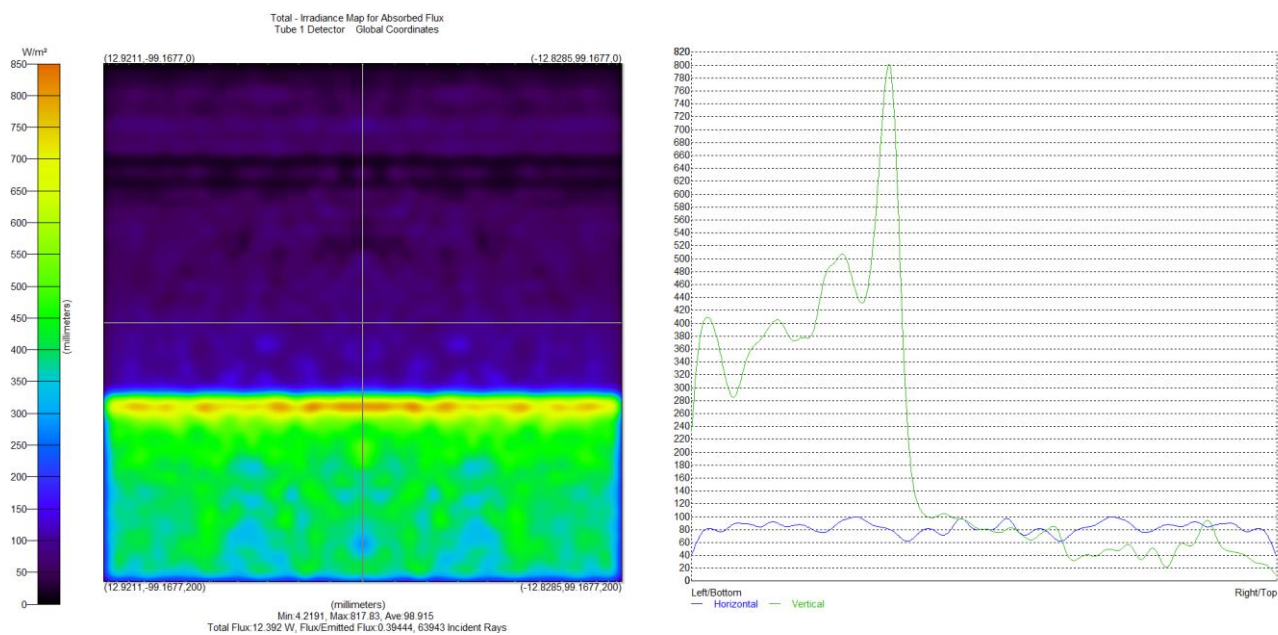
Parametry konfiguracji:

- Promień soczewki wynosi 200 mm, a jej ogniskowa 40 mm
- Soczewka umieszczona w otworze cylindra.
- Zwierciadła na dnie to skupiające zwierciadła sferyczne, skierowane na zewnątrz cylindra o promieniu krzywizny równym 331 mm.
- Perowskit umieszczony na ściankach tworzy cylinder o średnicy 200 mm i wysokości 230 mm. Część aktywna ma 210 mm wysokości.

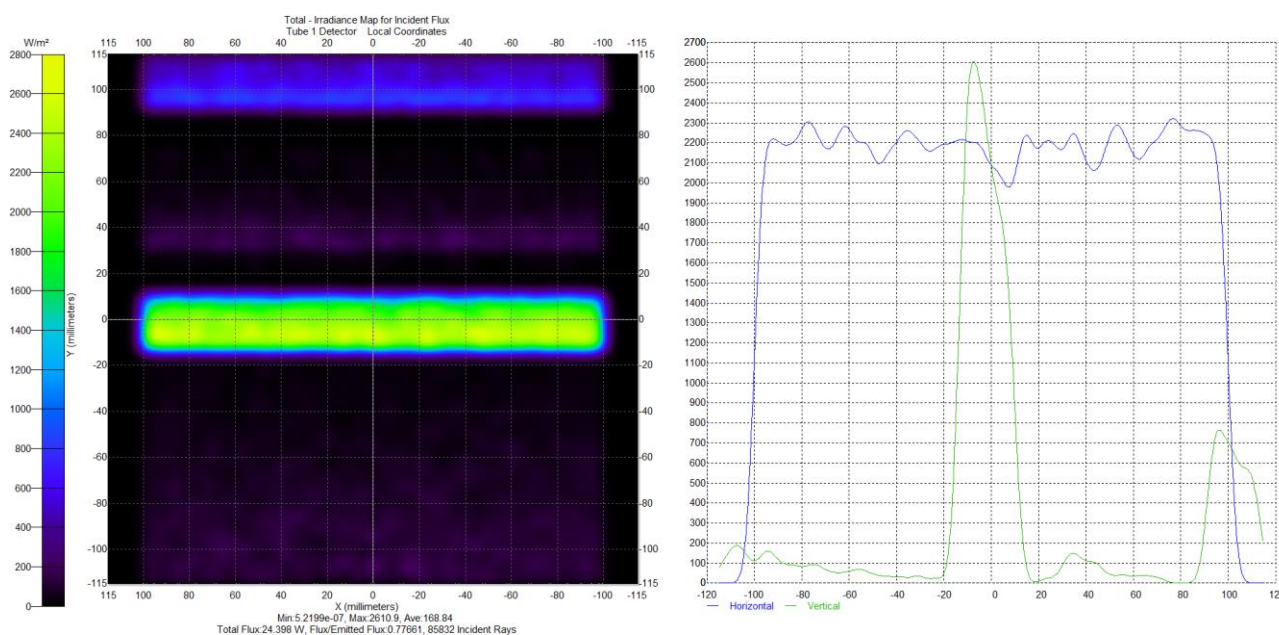
Moc uzyskana na ogniwie – 2.4398 W



Rys. 5.6 Rozkład natężenia – konfiguracja 2.5



Rys. 5.7 Rozkład natężenia – konfiguracja 2.6



Rys. 5.8 Rozkład natężenia – konfiguracja 3.1

Przedstawione konfiguracje nie dają oczekiwanych i satysfakcjonujących wyników. Rozkład natężenia na ściankach jest nierównomierny co może powodować nadmierne nagrzewanie się ogniwa, a także skutkuje dużą, niewykorzystaną powierzchnią. Zauważono również negatywny wpływ soczewki skupiającej na równomierność rozkładu promieni na powierzchni walca (rozkład pasmowy). Z tego względu zaprojektowano dodatkowe konfiguracje.

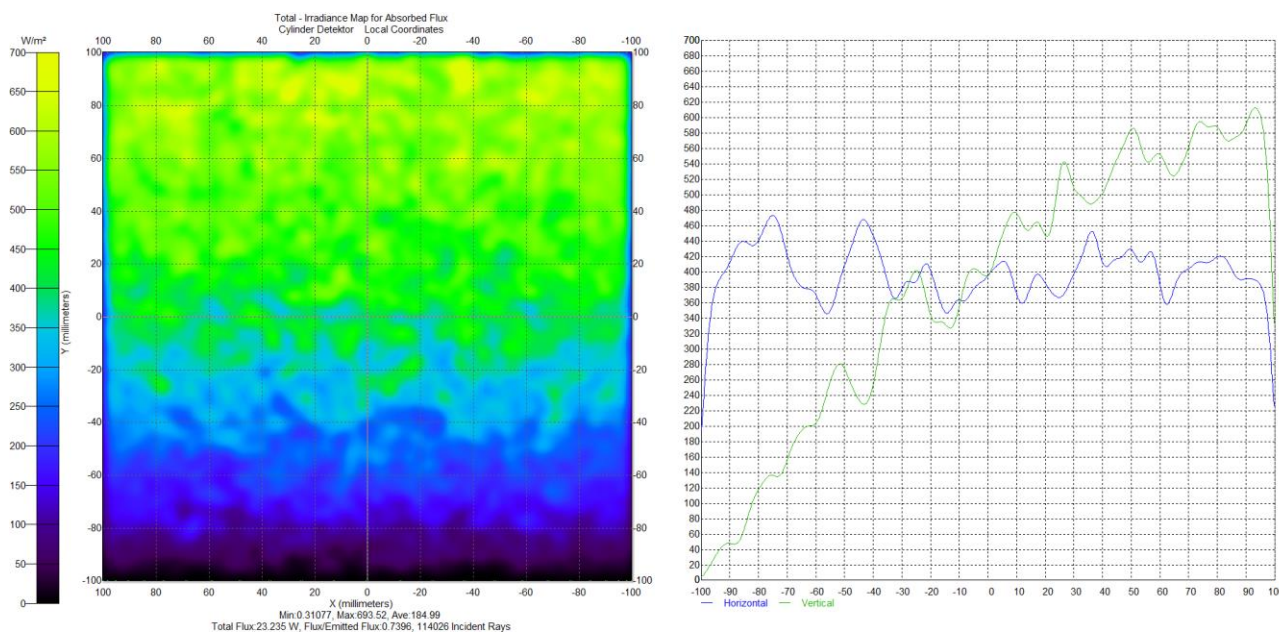
Konfiguracja 4.1 – 4.5

Parametry konfiguracji:

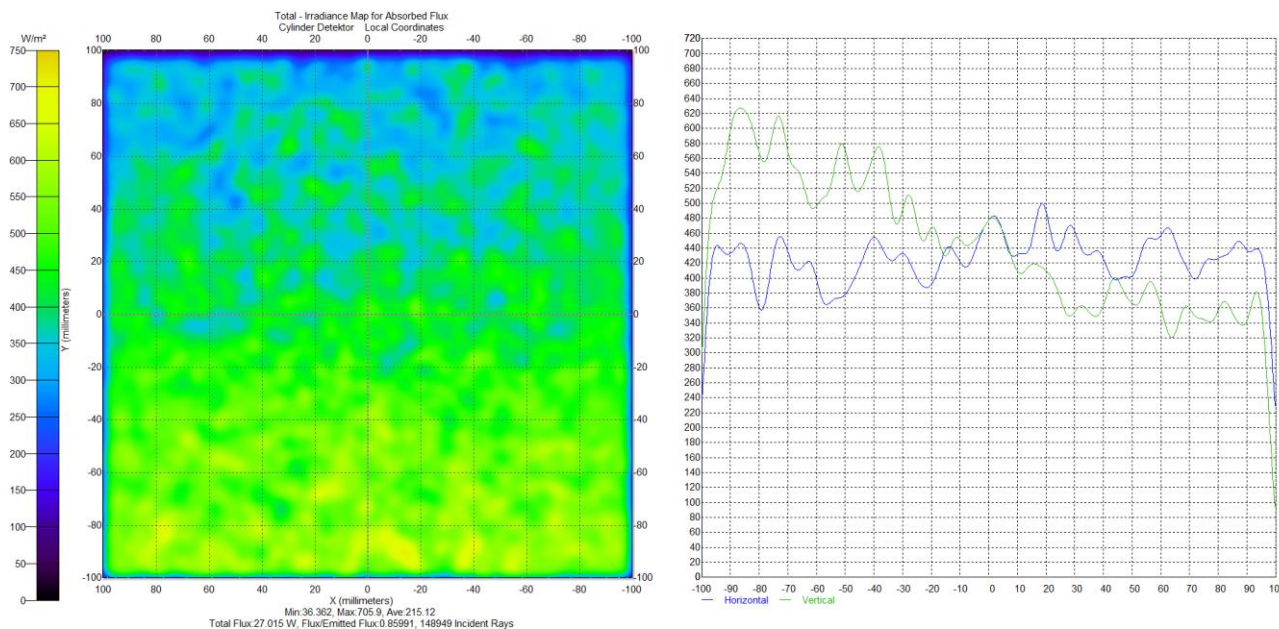
- Płytką płasko-równoległą umieszczoną w otworze cylindra z potrójną powłoką AR po obu stronach płytki,
- Brak soczewki,
- Zwierciadła na dnie o niestandardowym profilu.

Nr konfiguracji	Moc uzyskana na ogniwie [W]
0	2.5026
4.1	2.3235
4.2	2.7015
4.3	2.7200
4.4	2.6685
4.5	2.6377

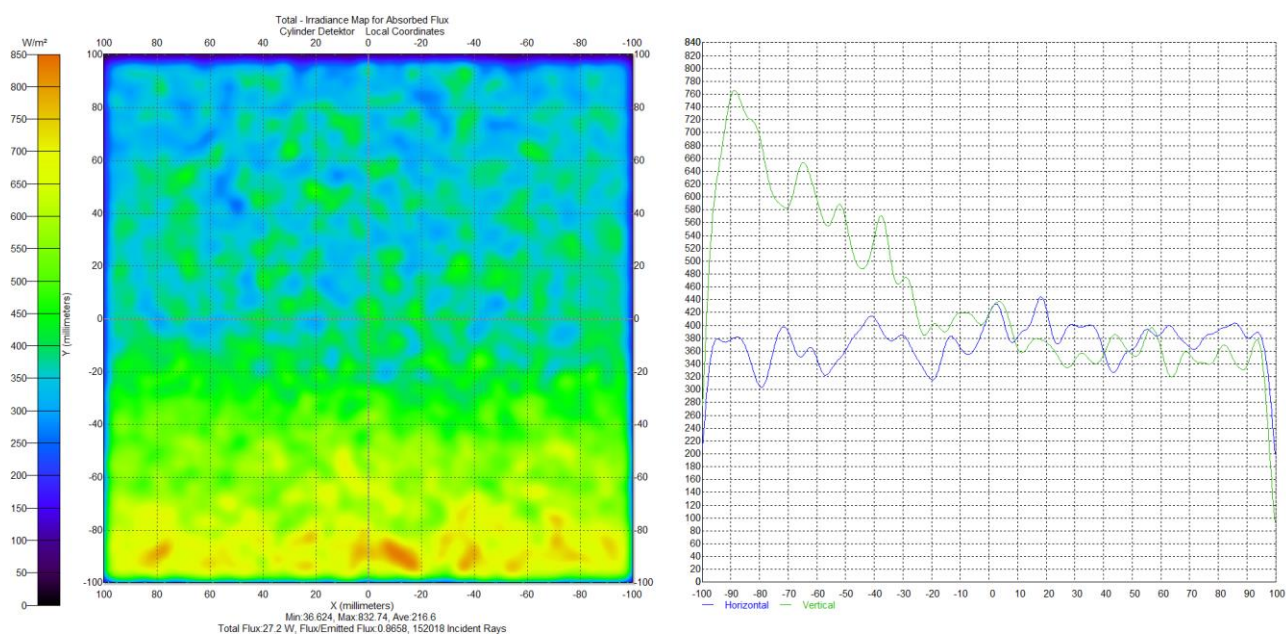
Największą moc uzyskano na ogniwie w konfiguracji 4.3. Pomimo, że moc jest największa to rozkład natężenia nie jest jednorodny i materiał może się nagrzewać (Rys 10.). Najbardziej zadowalające konfiguracje to konfiguracja 4.2 oraz 4.4.



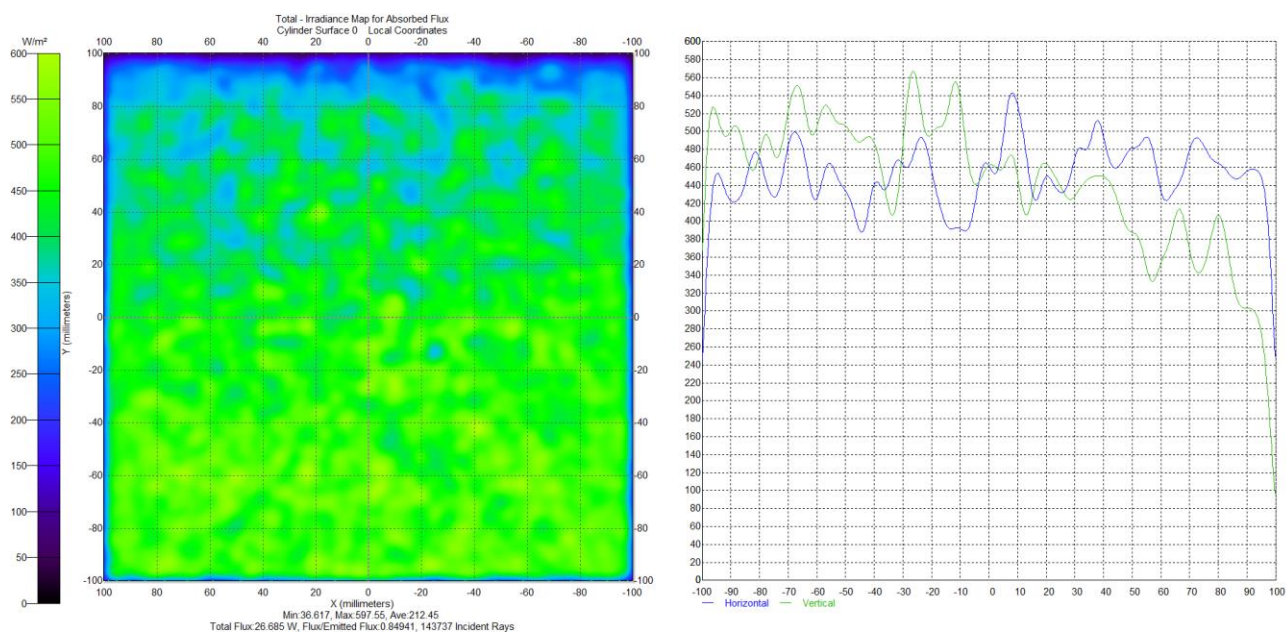
Rys. 5.9 Rozkład natężenia – konfiguracja 4.1



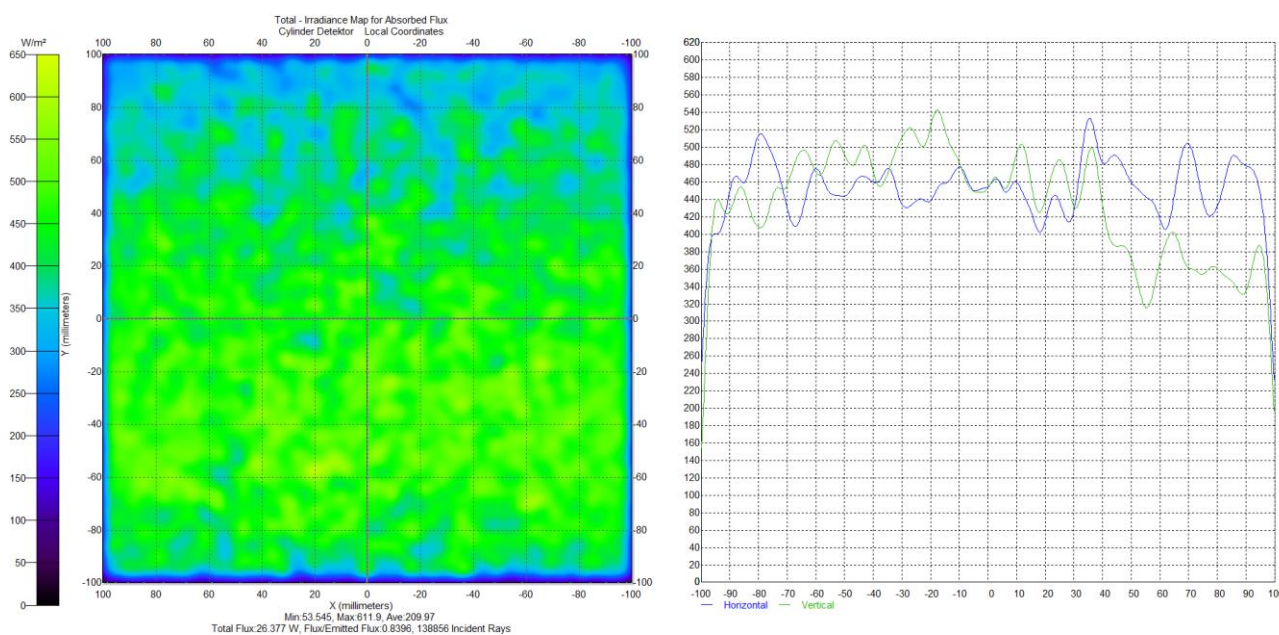
Rys. 5.10 Rozkład natężenia – konfiguracja 4.2



Rys. 5.11 Rozkład natężenia – konfiguracja 4.3



Rys. 5.12 Rozkład natężenia – konfiguracja 4.4

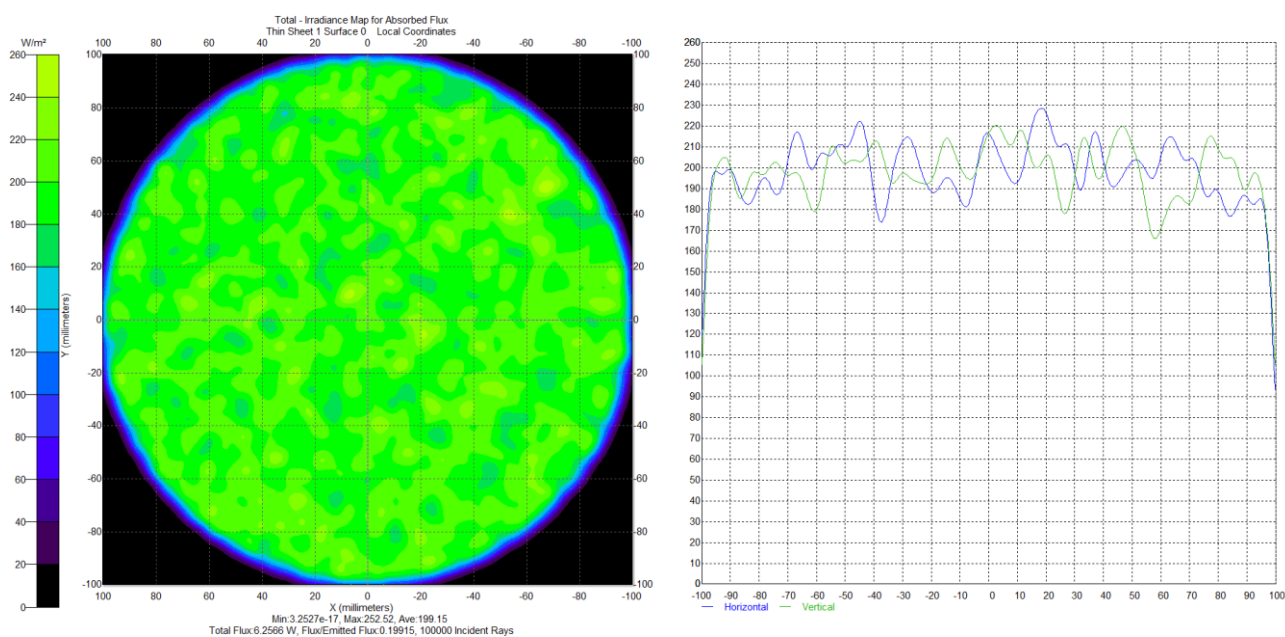


Rys. 5.13 Rozkład natężenia – konfiguracja 4.5

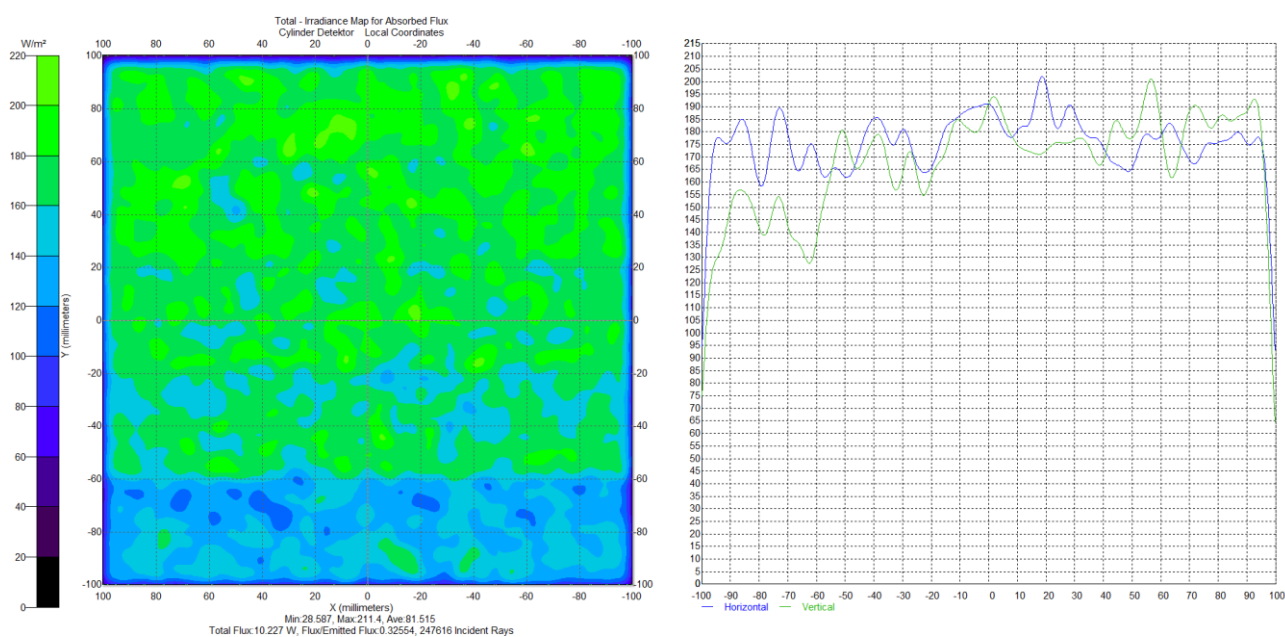
Wpływ właściwości fizycznych perowskitu na uzyskane wyniki.

Na obecny stan wydajność perowskitu wynosi 10%. Zwiększenie wydajności przez producenta pozwoliłoby na uzyskanie większej mocy na ogniwie. Projektowane konfiguracje wykorzystują największą zaletę panelu perowskitowego, giętkość. Umieszczenie go na ściankach cylindra pozwala wykorzystać ponownie promieniowanie od niego odbite, co jest niemożliwe w przypadku, gdy panel jest ułożony na płaskiej powierzchni (jak w konfiguracji referencyjnej). Zwiększenie współczynnika odbicia perowskitu zwiększyłoby uzysk jaki daje konfiguracja cylindra nad konfiguracją referencyjną.

Poniżej przedstawiono wyniki uzyskane dla konfiguracji 4.2 ze zmienionymi właściwościami panelu perowskitowego. Dla tej konfiguracji przyjęto, że **współczynnik absorpcji równy jest 0.2**, natomiast **współczynnik odbicia 0.8**.



Rys. 5.14 Rozkład natężenia - konfiguracja referencyjna ze zmienionymi właściwościami perowskitu



Rys. 5.15 Rozkład natężenia - konfiguracja 4.2 ze zmienionymi właściwościami perowskitu

Właściwości perowskitu	Moc uzyskana na ogniwie – układ referencyjny [W]	Moc uzyskana na ogniwie – układ z cylindrem [W]	Stosunek mocy na cylindrze do mocy na powierzchni koła
wsp. absorpcji 0.2 wsp. odbicia 0.8	0.6257	1.0227	163.45%
wsp. absorpcji 0.8 wsp. odbicia 0.2	2.5026	2.7015	107.95%

Dla wyżej przedstawionych właściwości, użycie konfiguracji z zastosowaniem cylindra daje uzysk **63.45%** w porównaniu do konfiguracji referencyjnej.

Wpływ pola powierzchni bocznej na irradiancję uzyskaną na powierzchni ogniwa

Irradiancja uzyskana na powierzchni to stosunek mocy uzyskanej na ogniwie do powierzchni tego ogniwa:

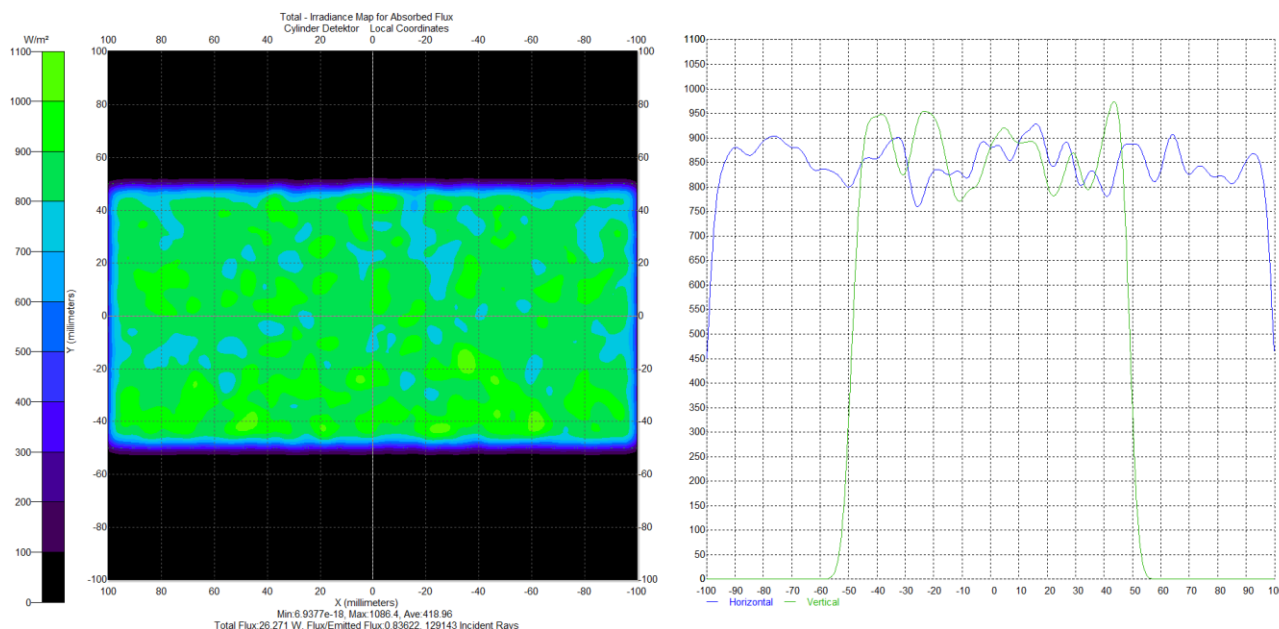
$$\frac{\text{Moc uzyskana na ogniwie [W]}}{\text{Powierzchnia ogniwa [m^2]}} = \text{Irradiancja } \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$$

Aby uzyskać większą irradiancję należałoby zwiększyć moc, bądź zmniejszyć pole powierzchni. Projekt zakłada, że apertura wejściowa oświetlana jest światłem o irradiancji 1000 W/m^2 . Oznacza to, że moc uzyskana na ogniwie zależna jest od pola powierzchni tego ogniwa. W zaprojektowanych konfiguracjach, promień apertury wejściowej równy jest 100 mm , co oznacza, że moc światła padającego jest dana wzorem:

$$P_{ref} = 1000 * \pi * 0.1^2 \approx 32 \text{ W}$$

Oznacza to, że największa moc możliwa do uzyskania na panelu (czyli w przypadku, gdyby miał 100% wydajności) wynosiłaby 32 W . Z tego względu uznaje się, że moc jest stała, gdy promień apertury wejściowej się nie zmienia. W takim przypadku zwiększenie irradiancji na powierzchni bocznej cylindra możliwe jest jedynie poprzez zmniejszenie powierzchni ogniwa. Jak wspomniano wcześniej, moc wejściowa zależna jest od promienia apertury wejściowej, więc zmniejszyć powierzchnię należy poprzez zmniejszenie wysokości cylindra.

Poniżej przedstawiono nową konfigurację (konfiguracja 5), która zakłada skrócenie wysokości cylindra do długości **$h = 100 \text{ mm}$** :



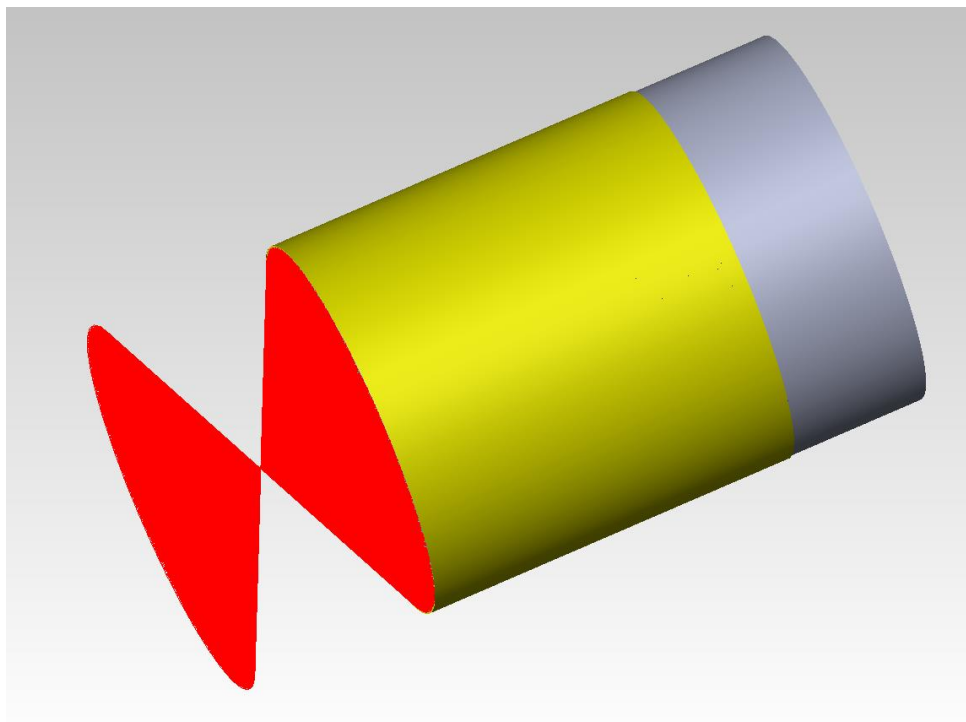
Rys. 5.16 Rozkład natężenia - konfiguracja 5

	Średnia irradancja na powierzchni [W/m ²]		
Wysokość cylindra	Konfiguracja 0	Konfiguracja 4.2	Konfiguracja 5
200 mm	800 W/m ²	500 W/m ²	-
100 mm	800 W/m ²	-	850 W/m ²

Zmniejszenie powierzchni skutkuje zwiększeniem średniej irradancji, ponieważ ta sama ilość światła rozłożona jest na mniejszej powierzchni. Skupienie światła może skutkować uzyskaniem większej mocy na ogniwie. Powierzchnię można zmniejszać do momentu, w którym ogniwo się nie nasyci bądź skupienie światła będzie na tyle duże, że będzie wprowadzać niepożądane nagrzanie materiału.

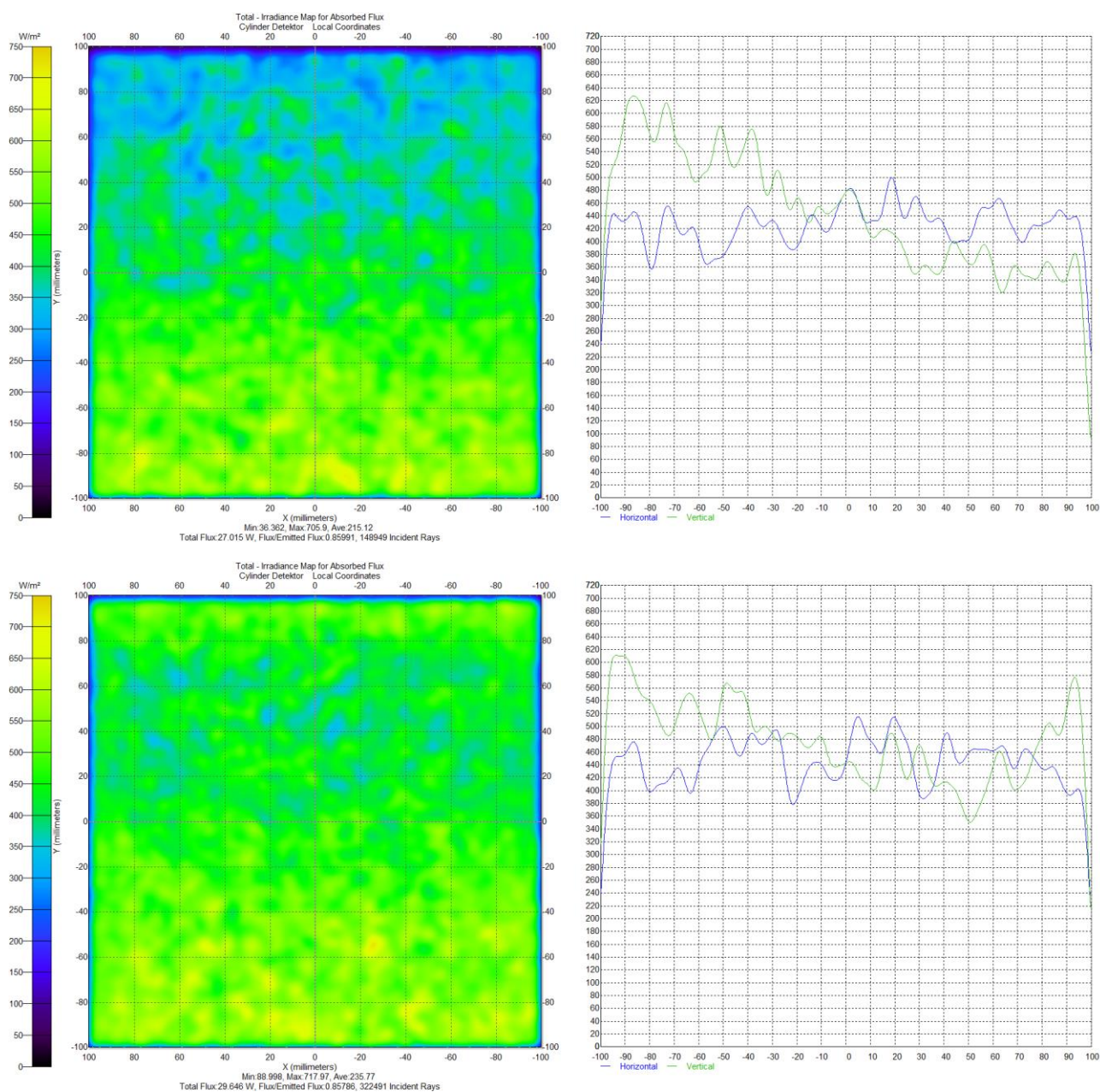
Wpływ promieniowania tła na rozkład natężenia.

Przeprowadzono symulacje sprawdzające wpływ promieniowania tła na rozkład natężenia na ściankach cylindra. Dodano źródło światła, które wypromieniowuje światło o irradancji równej 100 W/m². Promienie wpadają do układu pod kątem ok. 64° do dłuższej osi cylindra.

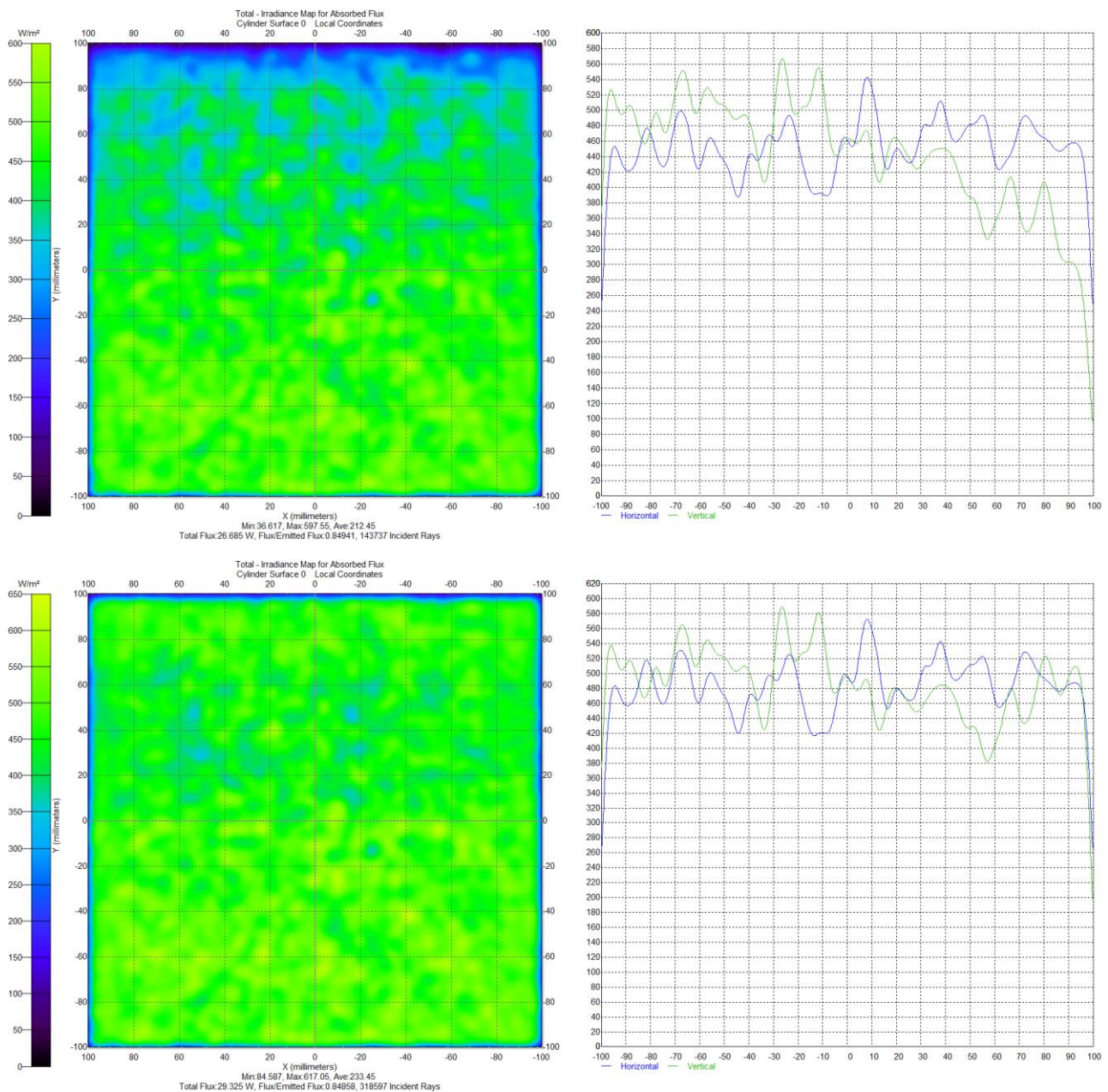


Rys. 5.17 Źródło promieniowania tła.

Symulacje przeprowadzono na konfiguracjach 4.2 oraz 4.4.



Rys. 5.18 Rozkład natężenia – konfiguracja 4.2 bez i z promieniowaniem tła.

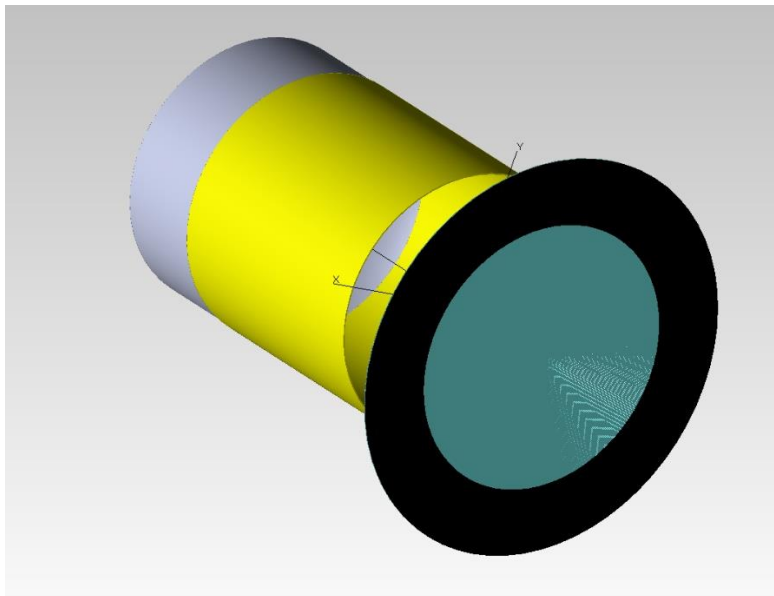


Rys. 5.19 Rozkład natężenia – konfiguracja 4.4 bez i z promieniowaniem tła.

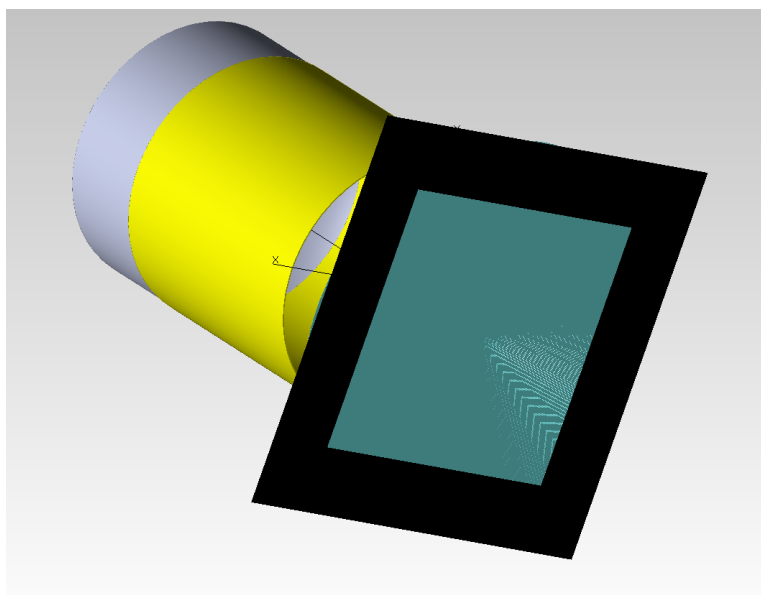
Jak widać na powyższych wykresach, promieniowanie tła pozwala uzyskać jeszcze bardziej równomierny rozkład natężenia na ściankach cylindra.

Wpływ kształtu soczewki na moc uzyskaną na ogniwie.

Zbadano wpływ kształtu soczewki wejściowej na moc uzyskaną na ogniwie. W tym celu zamodelowano apertury o kształcie koła (o promieniu 100 m) oraz kwadratu (o boku 100 mm).

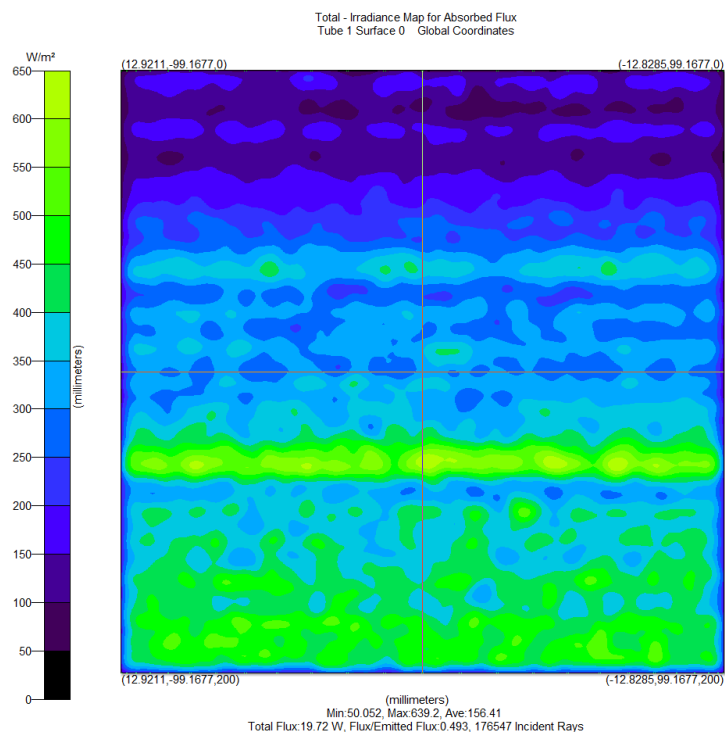


Rys. 5.20 Apertura kołowa.

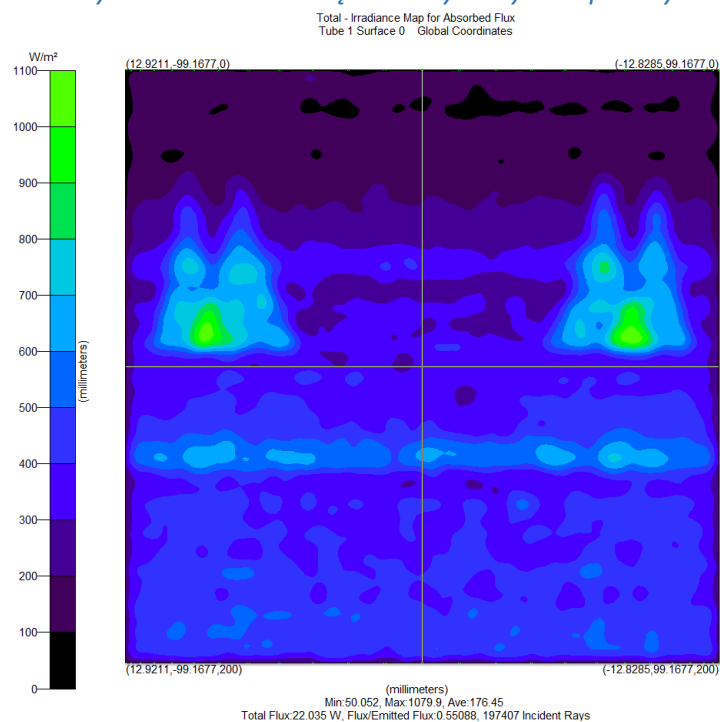


Rys. 5.21 Apertura kwadratowa.

Powyższe konfiguracje zostały oświetlone falą płaską o kwadratowym kształcie (bok 100 mm) i o irradiancji równej 1000 W/m^2 .



Rys. 5.22 Rozkład natężenia uzyskany dla apertury kołowej.



Rys. 5.23 Rozkład natężenia uzyskany dla apertury kwadratowej.

Powyższe symulacje udowadniają, że zastosowanie kwadratowej soczewki na wejściu zwiększa moc uzyskaną na ogniwie o **ok. 12%** dla danej konfiguracji. Wartość ta może być różna w zależności od zastosowanej konfiguracji. Zastosowanie kwadratowej soczewki wiąże się ze stratami uzyskanymi na soczewce. Należy również zwrócić uwagę na to, że soczewka musi znajdować się przed cylindrem, co wydłuża całą konstrukcję.

6. Wyniki

W tabeli poniżej zestawiono wszystkie zasymulowane konfiguracje oraz uzyskane wartości mocy w pojedynczym ogniwie przestrzennym.

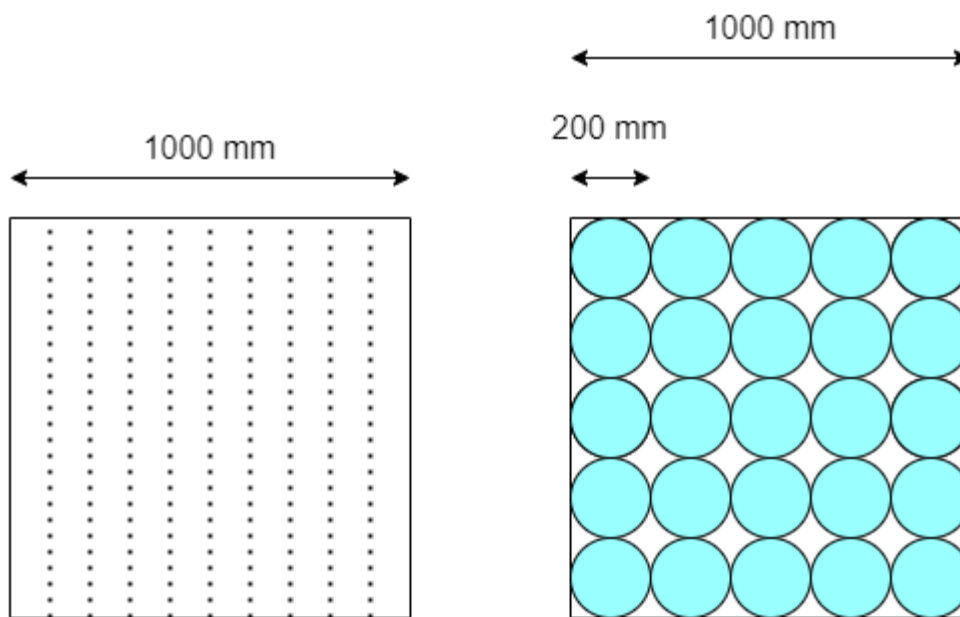
Właściwości fizyczne perowskitu:				
Współczynnik absorpcji: 0.8			Współczynnik odbicia: 0.2	
Konfiguracja 0				
2.5026 W			800 W/m ²	
Nr konfiguracji	Moc uzyskana na ogniwie [W]	Stosunek mocy na cylindrze do mocy na powierzchni koła	Średnia irradiancja na powierzchni [W/m ²]	Czy rozkład jest jednorodny?
2.5	1.0701	42.76%	-	NIE
2.6	1.2392	49.52%	-	NIE
3.1	2.4398	97.49%	-	NIE
4.1	2.3235	92.84%	400	NIE
4.2	2.7015	107.95%	500	TAK
4.3	2.7200	108.69%	-	NIE
4.4	2.6685	106.63%	460	TAK
4.5	2.6377	105.39%	440	TAK
5.0	2.6277	105.00%	850	TAK

Właściwości fizyczne perowskitu:				
Współczynnik absorpcji: 0.8			Współczynnik odbicia: 0.2	
Nr konfiguracji	Moc uzyskana na ogniwie [W]	Stosunek mocy na cylindrze do mocy na powierzchni koła	Średnia irradiancja na powierzchni [W/m ²]	Czy rozkład jest jednorodny?
0	0.6257	-	200	TAK
4.2	1.0227	163.45%	170	TAK

Na jednym ogniwie o aperturze kołowej, oświetlonym normalnie uzyskuje się 2.5026 W. Dla 25 ogniw ułożonych na 1 m² uzyska się 62.565 W.

Układając 25 cylindrów z ogniwami o mocy 2,7015W (konfiguracja 4.2) na powierzchni 1 m² uzyskano by 67.54 W (wzrost około 8%).

Średnia irradiancja uzyskana na powierzchni perowskitu zwiniętego walec (konfiguracja 4.2) wynosi ok. 500 W/m^2 .



Rys. 5.24 Przykładowa konfiguracja perowskitowego panelu fotowoltaicznego.

Na powyższy wynik wpływają takie czynniki jak:

- Właściwości folii, w którą opakowany jest panel perowskitowy (tj. absorpcja, reflektancja itp.).
- Wydajność produkcyjna panelu (na ten moment teoretycznie wynosi jedynie 10%).
- Krzywizna zwierciadła umieszczonego na dnie.
- Rodzaj zastosowanej płytki / soczewki na wejściu układu (materiał, powłoki).
- Rozmiary obudowy - walca.

W przypadku zastosowania konfiguracji bez soczewki (tylko płytka z warstwami antyrefleksyjnymi) głównym problemem z wykonaniem prototypu byłby skomplikowany kształt zwierciadła.

Uzyskane wyniki dla rozważanych konfiguracji nie są zadowalające w świetle celów projektu, które zostały zdefiniowane głównie w oparciu o wzrost powierzchni absorpcyjnej w przestrzennym ogniwie perowskitowym oraz na podstawie ogólnie dostępnych informacji technicznych o giętkich modułach perowskitowych wysokiej sprawności.

Dalsze prace optymalizacyjne mogą powodować nieznaczne zmiany mocy kosztem kolejnych komplikacji układu, co bezpośrednio wpłynie na dostępność i na koszty wytworzenia podzespołów.

7. Wnioski

Dla cylindra o średnicy 200 mm i wysokości 200 mm średnia wartość natężenia promieniowania rozłożonego równomiernie na ściankach wynosi 500 W/m^2 (konfiguracja 4.2). Wartość ta jest zbyt niska od pożądanej. Moc pojedynczego ogniwa w zaprezentowanej konfiguracji wynosi 2.7W, co w przypadku ogniwa ułożonego na 1 m^2 da moc 67,5W.

Uzyskanie irradiancji o wartości wymaganej $750 \pm 100 \text{ W/m}^2$ jest możliwe tylko w przypadku zmniejszenia powierzchni czynnej materiału światłoczułego. Przy średnicy 200 mm oraz wysokości 150 mm uzyskuje się 500 W/m^2 , natomiast przy wysokości 100 mm - 850 W/m^2

Zakładając wymianę materiału perowskitowego na CIGS, sprawność materiału czynnego wzrosłaby z 10 do 17%. Przy jednakowym poziomie absorpcji (80%) moc wzrosłaby z 2.7 W do 4.6 W.

Przy założeniu generacji mocy 600 W na powierzchni 2 m^2 wymagana jest moc 12 W z pojedynczego ogniwa przestrzennego (walca o średnicy 200 mm). Przy zadanych warunkach sprawność materiału światłoczułego powinna wynosić około 50%.

Biorąc pod uwagę powyższe wnioski, ogniwa perowskitowe lub CIGS na obecnym poziomie wydajności nie są w stanie sprostać wymaganiom technicznym zdefiniowanym jako kamienie milowe w zadaniu 2 w projekcie.